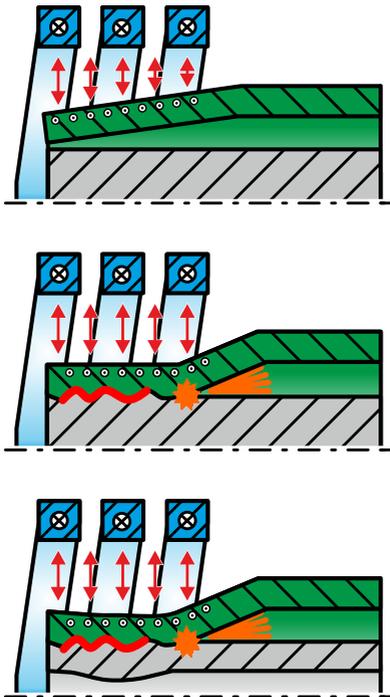


Jörn Lueg-Althoff

Fügen von Rohren durch elektromagnetische Umformung – Magnetpulsschweißen



Fügen von Rohren durch elektromagnetische Umformung – Magnetpulsschweißen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Jörn Lueg-Althoff

aus

Herdecke

Dortmund, 2018

Vorsitzende der Prüfungskommission: Jun. Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Klinge
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Prof. Dr.-Ing. Gunther Göbel
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne
Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2018

Dortmunder Umformtechnik

Band 104

Jörn Lueg-Althoff

**Fügen von Rohren durch elektromagnetische
Umformung – Magnetpulsschweißen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6558-9

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wesentliche Ergebnisse entstammen dem Teilprojekt A1 des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Schwerpunktprogramms 1640 (SPP 1640, „Fügen durch plastische Deformation“).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya für die jederzeit vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie die stetige Unterstützung und Förderung, die meine Promotion ermöglicht hat. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Göbel für die erfolgreiche Zusammenarbeit im SPP 1640 und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne danke ich für die Mitwirkung als Berichterstatter und Frau Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sandra Klinge für den Prüfungsvorsitz in meinem Promotionsverfahren.

Allen Kolleginnen und Kollegen des IUL, insbesondere der Abteilung Sonderverfahren, danke ich herzlich für die sehr angenehme, produktive Arbeitsatmosphäre und die vielfältige Unterstützung bei der Anfertigung meiner Dissertation. Außerordentlichen Dank richte ich an Soeren Gies und Marlon Hahn, die zunächst als Bürokollegen und anschließend in ihren Funktionen als Abteilungsleiter bzw. Obergeringenieur unzählige Male für sehr hilfreiche und immer konstruktive Diskussionen zur Verfügung standen. Jörg Bellmann von der Technischen Universität Dresden danke ich besonders für die freundschaftliche und bereichernde Zusammenarbeit im gemeinsamen SPP-Projekt und die zahllosen konstruktiven Diskussionen zum Magnetpulsschweißen, von denen diese Dissertation enorm profitiert hat. Für die Betreuung in meiner Anfangszeit in der Abteilung Sonderverfahren danke ich Dr.-Ing. Christian Weddeling. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haupt gebührt großer Dank für die geduldigen und lehrreichen Diskussionen im Bereich der Analytik.

Für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen bedanke ich mich bei den technischen Mitarbeitern des IUL, insbesondere Werner Feuer, Andreas Herdt, Dirk Hoffmann und Frank Volk. Für die Hilfsbereitschaft bei organisatorischen Fragestellungen danke ich Jeanette Brandt und Nina Hänisch. Frau Beate Ulm-Brandt danke ich für die sprachliche Durchsicht dieser Arbeit und Patrick Cramer für die Unterstützung bei der Bildgestaltung.

Neben anderen Studierenden haben Fabian Maaß, Bastian Schilling und Tobias Wiese als studentische Hilfskräfte und Victor Sullivan als Gaststudent auf vielfältige Weise zum Gelingen des Promotionsvorhabens beigetragen, wofür ich mich ebenfalls bedanke.

Nicht zuletzt bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie für die liebevolle fortwährende Unterstützung. Meiner wundervollen Frau Kyra danke ich ganz besonders für den jederzeit ermutigenden und motivierenden Rückhalt. Meinen Eltern Elvira und Heinz-Wilhelm bin ich für die bedingungslose Förderung dankbar, die meinen bisherigen privaten und beruflichen Werdegang möglich gemacht hat. Auch meiner Schwester Birte, meinem Schwager Max, meinem Neffen Ole sowie meinen Schwiegereltern Ute und Bernd danke ich herzlich für die Unterstützung, die den erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation ermöglicht hat.

Diese Arbeit ist meiner Familie gewidmet.

Dortmund, im Januar 2019

JÖRN LUEG-ALTHOFF

Abstract

In manufacturing, the ideal material for every intended application should be selected in order to guarantee an efficient and economical use of resources. Since most technical structures consist of more than one component, this rises the challenge of combining dissimilar materials by appropriate joining technologies. Collision welding processes like magnetic pulse welding (MPW) can be an alternative to conventional fusion-based welding processes. In MPW, firmly bonded areas are created as a result of a high-velocity impact without excessive heating of the parts. The increased use of non-ferrous metals with low specific resistance, which are predestined for using MPW, opens up new fields of application. Improvements in plant and tool technology as well as expanded capacities and possibilities of measurement technology and numerical process analyses support this development. The majority of the studies presented in literature are related to an extension of the range of weldable materials and geometries. Process windows usually remain at parameter level and emphasize the similarity of the process to explosive welding. However, there are process-related special features of the application of pulsed magnetic fields, which should be taken into account in examination and modeling of MPW.

The objective of this work is the analysis of MPW by electromagnetic compression of tubes from the viewpoint of forming technology. This comprises an investigation of the sequential process stages “free compression“ and “collision“. During free electromagnetic compression of aluminum tubes wrinkles can occur which can have both positive and negative influences on the MPW process. The wrinkle formation is governed by various parameters such as electrical, mechanical and geometrical features of the setup. Analytical equations are derived which enable a fast process analysis and adaption.

The conditions during the collision of a thin-walled aluminum flyer part and a steel cylinder are characterized with respect to the radial and axial velocity components and the collision angle. Differences between various MPW setups are revealed and attributed to differences in the discharge circuits of different pulse generators. At low discharge frequencies, lower radial impact velocities are sufficient for a sound weld. Taking the impact pressure and the magnetic pressure into account allows for a comparison of different setups as well as a targeted process adaption leading to efficient process conditions.

Finally, the influence of thin-walled inner joining partners is investigated. In this case, process limitations arise from the reduced stiffness of the parent part. Unwanted deformations can be detected by optical measurements or are calculated analytically. A reduction or even prevention of these deformations is achieved by reusable inserts made of plastics allowing for the manufacturing of lightweight multi-material joints.

Kurzzusammenfassung

Um einen effizienten und wirtschaftlichen Ressourceneinsatz zu gewährleisten, sollte in der Fertigungstechnik für jede Anwendung der ideale Werkstoff ausgewählt werden. Da die meisten technischen Strukturen aus mehr als einer Komponente bestehen, stellt sich die Herausforderung, ungleiche Materialien durch geeignete Füge Technologien zu verbinden. Kollisionsschweißverfahren wie das Magnetpulsschweißen (MPW) können eine Alternative zu herkömmlichen Schmelzschweißverfahren sein. Beim MPW entstehen Schweißnähte durch eine Hochgeschwindigkeitskollision ohne übermäßige Erwärmung der Fügepartner. Der verstärkte Einsatz von Nichteisenmetallen mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, die für den Einsatz des MPW prädestiniert sind, eröffnet neue Anwendungsgebiete. Verbesserungen in der Anlagen- und Werkzeugtechnik sowie erweiterte Möglichkeiten der Messtechnik und der numerischen Prozessanalyse unterstützen diese Entwicklung. Die meisten der in der Literatur vorgestellten Studien beziehen sich auf eine Erweiterung des Spektrums der schweißbaren Werkstoffe und Geometrien. Die Prozessfenster bleiben in der Regel auf Parameterebene und betonen die Ähnlichkeit des Prozesses mit dem Explosionsschweißen. Es gibt jedoch prozessbedingte Besonderheiten bei der Anwendung von gepulsten Magnetfeldern, die bei der Untersuchung des MPW berücksichtigt werden sollten. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des MPW von Rohren mittels elektromagnetischer Kompression aus umformtechnischer Sicht. Dies umfasst eine Untersuchung der sequenziellen Prozessstufen „freie Kompression“ und „Kollision“. Bei der freien elektromagnetischen Kompression von Aluminiumrohren können Falten entstehen, die sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf den MPW-Prozess haben können. Die Faltenbildung wird durch elektrische, mechanische und geometrische Eigenschaften des Aufbaus bestimmt. Es werden analytische Gleichungen abgeleitet, die eine schnelle Prozessanalyse und -anpassung ermöglichen.

Die Kollisionsbedingungen eines dünnwandigen Aluminium-Flyerteils mit einem Stahlzylinder sind durch die radialen und axialen Geschwindigkeitskomponenten und den Kollisionswinkel gekennzeichnet. Unterschiede zwischen verschiedenen MPW-Aufbauten werden aufgedeckt und auf Unterschiede in den Schwingkreisen verschiedener Pulsgeneratoren zurückgeführt. Bei niedrigen Entladefrequenzen sind geringere radiale Aufprallgeschwindigkeiten ausreichend für eine fehlerfreie Schweißnaht. Die Berücksichtigung des Aufpralldrucks und des magnetischen Drucks ermöglicht den Vergleich verschiedener Versuchsaufbauten sowie eine gezielte Prozessanpassung. Abschließend wird der Einfluss von dünnwandigen inneren Fügepartnern untersucht. In diesem Fall ergeben sich die Prozessgrenzen aus der reduzierten Steifigkeit des Parentteils. Unerwünschte Verformungen können durch optische Messungen erkannt oder analytisch berechnet werden. Eine Reduzierung oder gar Vermeidung dieser Deformationen wird durch wiederverwendbare Einsätze aus Kunststoff erreicht, die die Herstellung von leichten Multimaterialverbindungen ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

Vorabveröffentlichung von Inhalten	xi
Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Einteilung der Fügeverfahren.....	3
2.2 Stoffschlüssiges Fügen.....	4
2.2.1 Festkörperschweißverfahren	7
2.2.2 Pressschweißverfahren	7
2.2.3 Kollisionsschweißverfahren	8
2.3 Magnetpulsschweißen.....	16
2.3.1 Grundlagen der elektromagnetischen Umformung.....	16
2.3.2 Prozessprinzip des Magnetpulsschweißens.....	21
2.3.3 Prozessparameter des Magnetpulsschweißens	23
2.3.4 Anwendungen des Magnetpulsschweißens.....	27
2.3.5 Werkzeuge für das Magnetpulsschweißen.....	28
2.3.6 Prozessüberwachung	30
2.3.7 Analytische und numerische Prozessbetrachtung	35
2.4 Fazit zum Stand der Kenntnisse.....	36
3 Zielsetzung	39
4 Analysemethoden	41
4.1 Experimentelle Untersuchungen.....	41
4.1.1 Spulen und Pulsgeneratoren	41
4.1.2 Werkstoffkennwerte	43
4.1.3 Messung der Werkstückverschiebung.....	47
4.1.4 Messung des Kollisionswinkels	49
4.1.5 Messung der Kollisionsgeschwindigkeit.....	50
4.1.6 Analyse der Formänderung	50
4.1.7 Messung des Aufpralldrucks.....	52
4.1.8 Messung der magnetischen Flussdichte	53
4.2 Numerische Simulationen.....	56
4.2.1 Zeitharmonische Magnetfeldsimulation mit FEMM.....	56
4.2.2 Transiente Simulation mit LS-DYNA.....	59
4.3 Beurteilung des Fügeergebnisses.....	67
4.3.1 Schältest.....	67
4.3.2 Metallografie	71
4.4 Fazit zu den Analysemethoden	73

5	Prozessphase I: Ungebundene Rohrkompression	75
5.1	Analytische Beschreibung der ungebundenen Rohrkompression.....	77
5.2	Analyse der Formänderung bei der Rohrkompression	81
5.2.1	Einfluss der Entladecharakteristik.....	82
5.2.2	Einfluss der Werkstoffeigenschaften.....	84
5.2.3	Einfluss geometrischer Halbzeugeigenschaften.....	89
5.2.4	Einfluss des Feldformerschlitzes.....	93
5.2.5	Gewichtung der Einflussfaktoren.....	94
5.2.6	Vergleich der experimentellen und numerischen Untersuchungen	95
5.3	Aufbrechen von Oxidschichten.....	98
5.4	Auswirkungen der Rohrkompression auf den MPW-Prozess	100
5.5	Fazit zur Analyse der Prozessphase I.....	102
6	Prozessphase II: Aufprall und Verbindungsbildung	105
6.1	Voraussetzungen und Randbedingungen.....	105
6.2	Radiales Umformverhalten	106
6.2.1	Einfluss der Wirklänge.....	106
6.2.2	Einfluss der Entladefrequenz.....	111
6.2.3	Einfluss von Flyereigenschaften	120
6.2.4	Einfluss des Aufpralldrucks	122
6.2.5	Analytische Beschreibung der radialen Flyerumformung	138
6.3	Axiales Umformverhalten.....	142
6.4	Fazit zur Analyse der Prozessphase II	146
7	Einfluss dünnwandiger innerer Fügepartner	147
7.1	Vorgehensweise und Versuchsaufbau	148
7.2	Magnetpulsschweißen mit dünnwandigen Parentteilen.....	150
7.2.1	Detektion unerwünschter Parentdeformationen	153
7.2.2	Vermeidung unerwünschter Parentdeformationen.....	156
7.2.3	Weiterleitung und Reflexion von Stoßwellen	163
7.3	Bestimmung des Plastifizierungsdrucks dünnwandiger Parentteile	165
7.3.1	Annahmen.....	165
7.3.2	Ableitung des Plastifizierungsdrucks.....	166
7.3.3	Ergebnisse.....	169
7.4	Fazit zum Einfluss dünnwandiger innerer Fügepartner.....	171
8	Zusammenfassung und Ausblick	173
	Literaturverzeichnis	175
	Anhang	191
	Lebenslauf	199

Vorabveröffentlichung von Inhalten

Die nachfolgenden Veröffentlichungen sind im Rahmen der Erstellung dieser Dissertation entstanden. Die Vorabveröffentlichung von Forschungsergebnissen erfolgte mit Zustimmung des Promotionsausschusses.

- Lueg-Althoff, J.**, Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2016. Magnetic Pulse Welding of Dissimilar Metals in Tube-to-Tube Configuration. In: American Welding Society, Japan Welding Society (Hg.), *10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society*, Proceedings, Tokyo, Japan, S. 87–90.
- Lueg-Althoff, J.**, Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2016. Magnetic Pulse Welding of Tubes: Ensuring the Stability of the Inner Diameter. In: Redondo, L. M. S., Novac, B. M. (Hg.), *EAPPC with BEAMS and MEGAGAUSS*, 6th Euro-Asian Pulsed Power Conference, 21st International Conference on High-Power Particle Beams, 15th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Cascais, Portugal.
- Lueg-Althoff, J.**, Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2018. Influence of the Flyer Kinetics on Magnetic Pulse Welding of Tubes. *Journal of Materials Processing Technology* 262, S. 189–203.
- Lueg-Althoff, J.**, Lorenz, A., Gies, S., Weddeling, C., Göbel, G., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2014. Magnetic pulse welding by electromagnetic compression: Determination of the impact velocity. *Advanced Materials Research* 966–967, S. 489–499.
- Lueg-Althoff, J.**, Schilling, B., Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2016c. Influence of the Wall Thicknesses on the Joint Quality During Magnetic Pulse Welding in Tube-to-Tube Configuration. In: Tekkaya, A. E., Kleiner, M. (Hg.), *High Speed Forming 2016*, Proceedings of the 7th International Conference, Dortmund, Germany, S. 259–268.
- Lueg-Althoff, J.**, Schilling, B., Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A. E., Beyer, E., 2018. Influence of the Free Compression Phase on Magnetic Pulse Welding of Tubes. In: Daehn, G. S., Tekkaya, A. E. (Hg.), *High Speed Forming 2018*, Proceedings of the 8th International Conference, Columbus (OH), USA.
- Bellmann, J., **Lueg-Althoff, J.**, Schulze, S., Gies, S., Beyer, E., Tekkaya, A. E., 2016. Measurement and analysis technologies for magnetic pulse welding. Established methods and new strategies. *Advances in Manufacturing* 4 (4), S. 322–339.
- Lorenz, A., **Lueg-Althoff, J.**, Bellmann, J., Göbel, G., Gies, S., Weddeling, C., Beyer, E., Tekkaya, A. E., 2016. Workpiece Positioning during Magnetic Pulse Welding of Aluminum-Steel Joints. *Welding Journal* 95 (3), S. 101–109.

- Bellmann, J., Beyer, E., **Lueg-Althoff, J.**, Gies, S., Tekkaya, A. E., Schulze, S., 2017. Measurement of Collision Conditions in Magnetic Pulse Welding Processes. *Journal of Physical Science and Application* 7 (4), S. 1–10.
- Hahn, M., Weddeling, C., **Lueg-Althoff, J.**, Tekkaya, A. E., 2016. Analytical approach for magnetic pulse welding of sheet connections. *Journal of Materials Processing Technology* 230, S. 131–142.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
<i>a</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Beschleunigung; Voce-Parameter
<i>a_e</i>	mm	effektive Spaltbreite
<i>a_f</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	Flyerbeschleunigung
<i>a_m</i>	mm	Messabstand
<i>A_g</i>	%	Gleichmaßdehnung
<i>A_k</i>	mm^2	Kontaktfläche
<i>b</i>	mm; $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Breite; Voce-Parameter
<i>B</i>	T	magnetische Flussdichte
<i>c</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; -, -	Lichtgeschwindigkeit; Voce-Parameter; Konstante
<i>c_s</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Schallgeschwindigkeit
<i>C</i>	F; s^{-1}	Kapazität; Dehnratenparameter
<i>d</i>	mm	Entfernung
<i>D</i>	mm	Durchmesser
<i>E</i>	J	(Entlade-) Energie
<i>f</i>	s^{-1}	Frequenz
<i>f*</i>	s^{-1}	Eigenfrequenz
<i>f_b</i>	s^{-1}	Schwebungsfrequenz
<i>f_d</i>	s^{-1}	Frequenz des gebeugten Lichts
<i>F</i>	N	Kraft
<i>g</i>	mm	initialer Fügeabstand
<i>h</i>	mm	Höhe, Tiefe
<i>H</i>	A·m	magnetische Feldstärke
<i>I</i>	A; $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-2}$	elektrische Stromstärke; Kraftstoß
<i>J</i>	$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	elektrische Stromdichte

Zeichen	Einheit	Beschreibung
k	-	Faktor
k_f	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Fließspannung
l_w	mm	Wirklänge
L	H	Induktivität
M	H	Gegeninduktivität
n	-	Windungszahl
p	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$; -	Druck; Dehnratenparameter
r	mm	Radius
R	Ω ; mm	elektrischer Widerstand; Radius
R_m	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Zugfestigkeit
$R_{p0,01}$	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	0,01 %-Dehngrenze
$R_{p0,2}$	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	0,2 %-Dehngrenze
s	mm	Blechdicke, Rohrwandstärke
s_f	mm	Flyerwandstärke
s_{skin}	mm	Skintiefe
t	s	Zeit
t_{rise}	s	Anstiegszeit
T	s	Periodendauer
u	mm	Verschiebung
U	V	elektrische Spannung
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Geschwindigkeit
x	mm	Koordinatenachse; Abstand
y	mm	Koordinatenachse
z	mm	Koordinatenachse
β	$^\circ$	Kollisionswinkel
δ	s^{-1}	Dämpfungsfaktor
ε	-	technische Dehnung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\dot{\epsilon}$	s^{-1}	Dehnrate
κ	$S \cdot m^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge
μ	$kg \cdot m^{-2}$	Massenbelegung
μ_r	-	Reibbeiwert; relative Permeabilität
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
σ	$N \cdot mm^{-2}$	Spannung
$\tau_{aB,max}$	$N \cdot mm^{-2}$	Maximale Scherspannung
φ	-	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	s^{-1}	Dehnrate, Formänderungsgeschwindigkeit
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
a	außen; Beschleunigung...
c	Kollisions...
d	Plastifizierung; Detonation
dyn	dynamisch
e	effektiv; Entladungsende
exp	experimentell
Eloxal	eloxiert
f	Flyer...
final	Finaler Wert
fit	gefittet
FF	Feldformer...
i	Aufprall...; innen
<i>i</i>	Laufindex

initial	Initialwert
j	Laufindex
krit	kritisch
L	Last...; Lorentz...
m	magnetisch; mittel...
max	maximal
min	minimal
n	normal...; Nut...
nom	nominal...
N	normal...; Nabe...
p	Parent...
r	radial...; Reibungs...
res	resultierend
R	Rohr...
schäl	Schäl...
sim	simuliert
stat	statisch
Sp	Spule..., Spulen...
t	Zeit
v	Vorspann...
W	Welle, Werkstück
zug	Zug...
θ	tangential...

Physikalische Konstanten

Zeichen	Wert	Beschreibung
c	299.792.458 m·s ⁻¹	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
μ_0	4 π ·10 ⁻⁷ N·A ⁻²	Magnetische Feldkonstante

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> – Amerikanisches Eisen- und Stahl-Institut, Fachverband der Stahlindustrie
ALE	<i>Arbitrary Lagrangian-Eulerian</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMR	<i>Colossal MagnetoResistance</i> – Kolossaler magnetoresistiver Effekt
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EM	Elektromagnetisch
EME	Elektromagnetische Expansion
EMG	Pulsgenerator EmGen
EMG5	Pulsgenerator EmGen Typ 5
EMK	Elektromagnetische Kompression
EMU	Elektromagnetische Umformung
EXW	<i>Explosive Welding</i> – Explosionsschweißen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i> – Simulationsprogramm zur Lösung elektromagnetischer Probleme
HK	Hüllkurve
IHU	Innenhochdruckumformen
i. O.	in Ordnung
IUL	Institut für Umformtechnik und Leichtbau der TU Dortmund
MF	Pulsgenerator Magneform Serie 7000 der Fa. Maxwell
MPW	<i>Magnetic Pulse Welding</i> – Magnetpulschweißen
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – US-amerikanische Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft

OFHC	<i>Oxygen-Free High Thermal Conductivity</i> – Sauerstofffrei mit hoher Wärmeleitfähigkeit
PDV	<i>Photonic Doppler Velocimetry</i> – optisches Geschwindigkeitsmessverfahren nach dem Laser-Doppler-Prinzip
PR	Pressrohr
PUR	Polyurethan
RT	Raumtemperatur
S	Schalter
SMU	Pulsgenerator SMU 0612 FS der Fa. Poynting (SMU = Stoßstromanlage zur magnetischen Umformung)
SPP	Schwerpunktprogramm – koordinierte Förderlinie der DFG
USG	Untere Schweißgrenze
VFAW	<i>Vaporizing Foil Actuator Welding</i> – Schweißen mittels vaporisierender Folien
V. M.	Von Mises
wb	wärmebehandelt
WR	Walzenrohr